

# Физика высоких энергий и ИЯФ

*А. Н. Скринский*

Я попытаюсь рассказать об Институте ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск).



Основное направление, которым мы занимаемся со дня создания нашей организации (а «нам» 40 лет), – это физика элементарных частиц (или физика высоких энергий) и немножко физика ядра. Это область наших фундаментальных исследований. Термоядерные исследования мы тоже относим к фундаментальным, хотя они имеют конкретную цель, и по сравнению с физикой элементарных частиц это, конечно, сугубо прикладная область. Но практически там еще много вопросов, которые подлежат физическому осмыслению и разработке физической, а не инженерной. Тем не менее примерно половина суммарных усилий нашего института – это работы в области ФЭЧ.

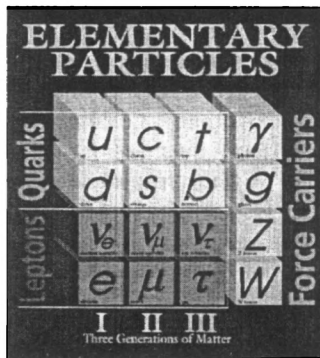
Конечно, надо понимать, что физика делается не в одном институте или нескольких институтах – это общемировой процесс, и для нас принимать участие в этих исследованиях наиболее глубоких законов природы – цель жизни, основной интерес и так далее. Попутно, из-за того, что мы работаем на *переднем фронте человеческого знания*, мы (т. е. ФЭЧ и ФВЭ) сталкиваемся с *принципиально новыми задачами* разного характера, с еще *неизученными физическими явлениями*,

появляются принципиально новые приложения. И «попутные приложения» – это важная часть наших забот, важный источник финансирования наших фундаментальных исследований, дающий нам возможность заниматься «высокой наукой» и получать от этого удовольствие.

Если вы попробуете взглянуть на сегодняшний день глазами человека из 30–40-летнего далека, то вы совершенно не узнаете нашу область. Из разрозненных и выглядящих совершенно случайными и не связанными между собой фундаментальных взаимодействий (электромагнитного, слабого и сильного) появилась сегодня уже очень зрелая так называемая **стандартная модель**, которая в каких-то своих частях дает уже очень глубокую и очень точную картину строения материи (в области сильных взаимодействий это, конечно, не так, и это связано уже не с недостатком фундаментального знания, фундаментальных уравнений, а с неумением эти уравнения решать; поэтому такой точности еще нет). Хотя, конечно, до ощущения, что мы вот уже понимаем, как устроен мир, – до этого еще далеко.

При этом я хотел бы подчеркнуть, что физические процессы, которые мы изучаем при сверхмалых расстояниях и сверхвысоких энергиях, – это одновременно процессы, проявляющиеся в Мегамире, ответственные за формирование Вселенной и т. д.

К настоящему времени можно сказать, что уже установлено, что все разнообразие элементарных частиц (или того, что раньше называлось элементарными частицами) состоит из фундаментальных частиц, из трех поколений частиц, связанных между собой силами. Эти частицы – все фермионы, все имеют спин  $1/2$  и имеют свои античастицы, и связаны силами, представленными частицами со спином 1. Сюда входят фотон,  $W$  и  $Z$ -бозоны, осуществляющие электрослабое взаимодействие, и глюоны, осуществляющие сильное взаимодействие.



Непосредственно сейчас текущая острая (в масштабах 10 лет) задача – это обнаружить частицу или систему частиц со спином 0 (по сегодняшним понятиям) – так называемый Хиггс-бозон, взаимодействием с которым определяется масса любой фундаментальной частицы.

Но чтобы не было ощущения, что физика уже кончилась, что осталось уточнить силы связи между частицами, и все будет закончено, можно сказать, что сегодня свободных параметров в стандартной модели еще около 25–27, т. е. это еще, конечно, не настоящая теория, которая из малого числа законченных предположений может построить мир. До этого еще очень далеко.

Наша область науки связана с высокими энергиями частиц, а высокие энергии связаны с большими масштабами большинства продуктивных установок и экспериментов, которые дают основную часть фундаментальных знаний в ФЭЧ. Это означает огромный масштаб ускорителей, детекторов, огромные потоки подлежащей обработке информации. При этом эти информационные потоки уже не ограничиваются внутрилабораторными, внутриустановочными потоками. Сейчас все в большей мере они приобретают глобальный характер в том смысле, что эксперименты ведутся в одном месте, обрабатываются во многих других местах и даже уже ставится вопрос о том, что установки следующего поколения будут находиться в каких-то конкретных местах, а управлять ими, получать, хранить и обрабатывать информацию с них будут совершенно распределенно в мире – в тех местах, где это рационально.

В нашем Институте 2800 человек – за последние 10 лет он немножко уменьшился, но оказался самым большим в Академии наук (раньше было много больших институтов, а сейчас они либо распались, либо резко уменьшились). Наши коллективы, которые ведут эксперименты на детекторе КЕДР и на комплексе ВЭПП-4М в целом, например, или создают новый комплекс ВЭПП-5 – это лаборатории с несколькими десятками физиков и инженеров. А сегодняшние публикации по ЛЭП (самому крупному в мире электрон-позитронному коллайдеру в ЦЕРН, кстати, только что разобранному) – они на одной странице содержат список институтов-участников, а на следующих уже список авторов. Для установок следующего поколения (LHC в ЦЕРН) это сдвигается еще на один шаг, первая страница посвящена уже перечислению стран-участниц данного эксперимента. С этим связана, конечно, и длительность экспериментов – от момента, когда начали обсуждать постановку эксперимента, до момента, когда получили основные результаты, стандартное время сейчас 15–20 лет.

И еще один пункт, который я уже подчеркивал, – это широкое и многообразное международное сотрудничество. Это совершенно необходимо, необходимо не из идеологических, политических соображений, а из совершенно практических. То есть быстрее и полнее

продвигается тот, кто привлечет научно-технические силы из любой точки земного шара, которые наилучшим образом подходят для решения данной задачи – независимо от географии, политической ориентации и прочих таких моментов.

Научная жизнь в России сейчас очень затруднена. Особенно это касается в длительном плане фундаментальной науки, и особенно «большой» науки. Той, что связана с масштабными проектами, установками, крупными коллективами и прочее. (Практически это, вообще говоря, не совсем правда, что самое плохое положение в фундаментальной области. В среднем это правда. Но большинство прикладных институтов живут сейчас в общем-то хуже, чем лучшие из институтов, занятых фундаментальной наукой.) Здесь есть некоторые моменты, которые всем хорошо известны. Это низкий уровень государственной поддержки. Отсюда множество человеческих проблем. Затруднения не только строить, создавать, начинать новые проекты, но и уже даже те установки, которые построены и на сегодняшний день остаются хорошими, достаточно передовыми – на их эксплуатацию денег уже не хватает. Хорошая сторона – то, что это приводит к еще большей необходимости международного сотрудничества, которое опять дает и плюсы, и минусы – мы еще будем об этом говорить. Я уже сказал об общих проблемах, которые характерны для фундаментальной науки в России. Но в некоторых редких случаях тем не менее не только работают те установки, которые остались передовыми в мире на сегодняшний день, но и развиваются новые проекты. ИЯФ в этом смысле такой редкий случай.

Как вы, наверное, знаете, мы были пионерами встречных пучков. Сегодня метод встречных пучков стал основным методом в ФЭЧ, основным поставщиком фундаментальной информации. Первые две такие установки заработали в Стэндфорде и в Новосибирске (ВЭП-1). Заработали они на эксперимент в 1965 г. и проработали 3 года. ВЭП-1 – это был электрон-электронный коллайдер, который позволил провести проверку справедливости закона Кулона на малых расстояниях; но главное – было показано, что можно вести эксперимент на встречных пучках. Это то, что вызывало максимум подозрений в то время у всех, даже у «продвинутых» физиков, у молодых, и тем более у немолодых.

Но гораздо более богатые возможности для физики элементарных частиц открылись бы с переходом на столкновения электронов и позитронов – т. е. частиц и античастиц. И мы начали разработку такого комплекса на энергию до 1,4 ГэВ (суммарную) в 1959 г. –

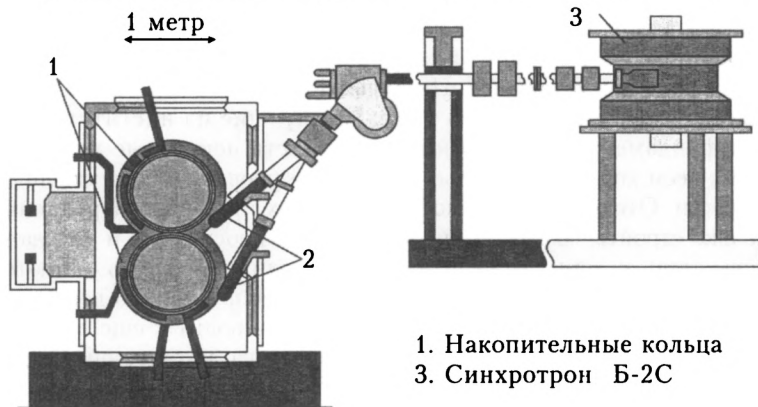
**ВЭП -1:  $e^-e^-$  коллайдер**

$E = 90 \text{ МэВ} - 320 \text{ МэВ (полная)}; L = 5 \times 10^{27} \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}$

Эксперименты 1965–1967 – параллельно с Принстон-Стэнфордскими кольцами:

электрон-электронное упругое рассеяние,

двойное тормозное излучение (первое наблюдение и изучение).

**ВЭПП-2: электрон-позитронный коллайдер**

(первые в мире аннигиляционные  $e^+e^-$  эксперименты; 1967–1970)

– Первое наблюдение рождения векторного мезона при аннигиляции и систематическое изучение  $\rho$ ,  $\omega$ ,  $\phi$ -мезонов.

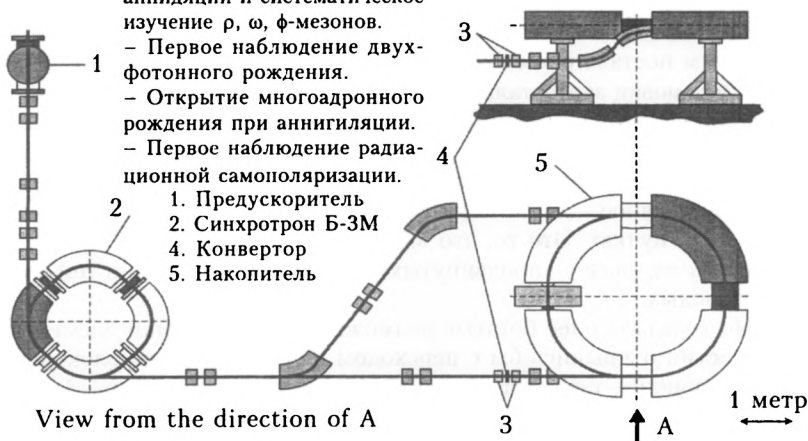
– Первое наблюдение двухфотонного рождения.

– Открытие многоадронного рождения при аннигиляции.

– Первое наблюдение радиационной самополяризации.

1. Предускоритель
2. Синхротрон Б-3М
4. Конвертор
5. Накопитель

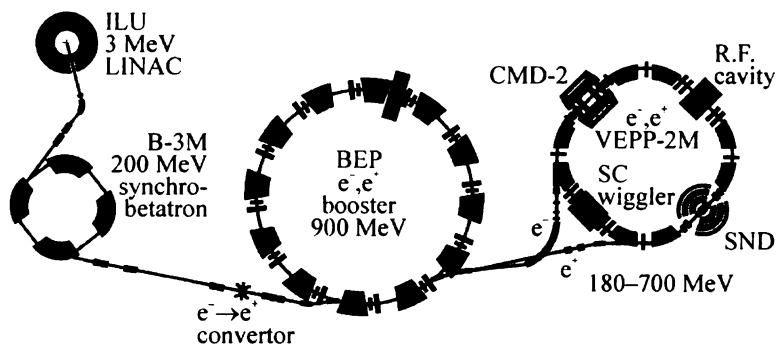
$E = 1,4 \text{ ГэВ (полная)}$   
 $L = 4 \times 10^{28} \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}$



задолго до того, как начал работать ВЭП-1. И это несмотря на то, что уж в такой успех не верил почти ни один физик. Тем не менее, первые в мире эксперименты по изучению процессов, происходящих при аннигиляции электронов и позитронов, начались в Новосибирске на установке ВЭПП-2 в 1967 г.

В дальнейшем эта установка была заменена на установку с той же энергией (1,4 ГэВ в системе центра масс). Это установка ВЭПП-2М, которая проработала для нас исключительно рекордное время – 25 лет (с 1974 г.). При этом, конечно, много раз некоторые элементы менялись, развивались детекторы, и она была основным мировым поставщиком фундаментальной информации в своей области – потому, что она была абсолютным лидером по светимости, т.е. по производительности, причем не на 20 %, а в 100 раз по сравнению с ВЭПП-2. При этой малой энергии ни одна другая установка не могла работать эффективно. Приведем пример результатов, которые получены на ней. В частности, сечение рождения пар пионов, троек пионов, с характерными, непонятными пиками, изучены очень слож-

### Коллайдерный комплекс ВЭПП-2М



Эксперименты велись в 1974–2000 гг.;

–  $2E = 0.4 \div 1.4$  ГэВ;

–  $L_{max} = 4 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$  at  $E_0 = 510$  MeV;

– Полная интегральная светимость  $\approx 80 \text{ пб}^{-1}$   
 ==> миллиард полезных событий!

ные и интересные процессы. Одна вещь, которая сегодня оказалась остро востребованной – это некоторый интеграл по этой области от полного сечения аннигиляции в адроны, который прямо входит в то,

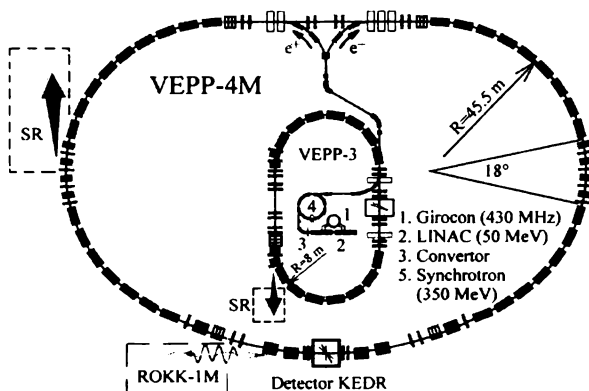
что называется аномальной частью гиромангнитного отношения мюона, которая только что измерена с очень высокой точностью в Брукхевене в США; и без этих данных, без такой точности, до которой нам удалось дойти, никаких выводов из этих великолепных мюонных экспериментов сделать было бы невозможно. Адронная часть в некотором смысле тривиальна, а вот неадронная часть (электрослабая, а за ней – новая физика) – все они говорят о том, что все это объясняется отклонениями от предсказаний вместе со всеми нашими поправками. Такое отклонение было бы прямым указанием на существование суперсимметричных частиц, но это уже дело будущего – разбираться.

Сейчас ВЭПП-2М демонтирован. Мы решили заменить ВЭПП-2М новым коллайдером на несколько большую энергию. В области энергий 1,4–2 ГэВ существует плохо изученное «окно», которое наука «проскочила», и сейчас мы строим новый накопитель ВЭПП-2000 на том же месте, где стоял ВЭПП-2М, немного больший по диаметру. Повышение энергии вместе с модернизацией детекторов даст нам при сравнительно малых вкладываемых средствах вполне интересные новые – в мировом плане – возможности.

Другой наш накопитель – давно существующий и теперь полностью реконструированный большой, гораздо больший (периметр 350 м) накопитель ВЭПП-4М с детектором «КЕДР». Я не могу не вспомнить целый ряд очень интересных экспериментов, которые были выполнены на наших накопителях (в основном на ВЭПП-4 до его вынужденной модернизации): в ИЯФ был предложен и развит метод **резонансной деполаризации**, который позволил измерять массы элементарных частиц с очень высокой точностью. Рекордный выигрыш для  $U$ -мезона (частицы массой 10 ГэВ/ $c^2$ ) – точность измерения 100 кэВ/ $c^2$ ! Это в 100 раз выше, чем та точность, которая достигалась на других установках другими методами.

Сейчас на ВЭПП-4М поставлен совершенно новый детектор «КЕДР». Это уже для нас очень крупная установка. В частности, это рекордная в мире установка по масштабу жидко-криптонового электромагнитного калориметра – это около 30 т жидкого криптона. Это все работает, там начались эксперименты, вы вполне еще успеваете к самому интересному – для тех, кто захочет этим заниматься. Особенностью ВЭПП-4М является то, что можно мерить оставшиеся после взаимодействия электроны и позитроны, т. е. не только аннигиляционный канал изучать, а смотреть канал, когда остаются и электроны, и позитроны, но с отклоненной энергией и с отклоненным направлением

**Электрон-позитронный накопитель ВЭПП-4  
до 11 ГэВ полной энергии  
(рекордсмен России по рождающимся массам)**

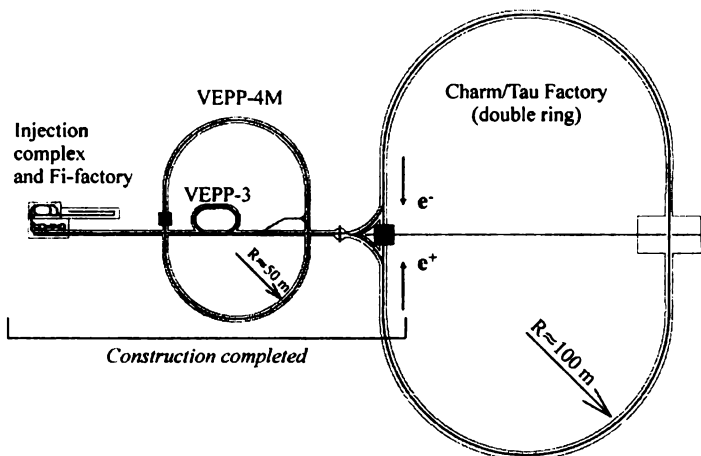


движения. Спектрометры, которые делались для электронов и позитронов, остающихся после реакции, дают возможность заниматься так называемой двухфотонной физикой с разрешением по массе двухфотонного события 10 МэВ и ниже. Это много раз уже делалось, много таких экспериментов поставлено, но качество того, что получается здесь, на порядок лучше того, что было возможно до сих пор, и это фактически открывает новое окно на адронную спектроскопию, на те проблемы, которые связаны с квантовой хромодинамикой, открывает новос электромагнитное окно как в аннигиляционном канале, но двухфотонное, т. е. с квантовыми числами, характерными не для одного фотона, а для двух. Поэтому этот новый класс частиц может изучаться в такой постановке, это очень интересный эксперимент.

Сейчас в ИЯФ создается – в чрезвычайно сложных условиях, практически без государственной поддержки – новый комплекс ВЭПП-5 с электрон-позитронными встречными пучками на полную энергию до 5 ГэВ (так называемая Чарм/Тау-фабрика), который (при успехе!) будет обладать уникальными на ближайшие 10 лет возможностями: светимость – до  $10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$  (на три с лишним порядка выше, чем лучшая существующая в этой области энергия); продольная поляризация в месте встречи и очень высокая монохроматичность при хорошей светимости. Ни продольная поляризация, ни



## ВЭПП-5 (схема)



улучшенная монохроматичность не предусмотрены в других проектных предложениях.

Для инъекции в будущий набор накопителей Института нам нужно иметь очень интенсивные и хорошего качества сгустки электронов и позитронов. Комплекс ВЭПП-5 включает в себя новый инжекционный комплекс, который позволит и существенно улучшить возможности двухфотонной физики на ВЭПП-4М, и получить высокую светимость на Чарм/Тау-фабрике.

А что касается Фи-фабрики – мы еще посмотрим, стоит ли нам этим заниматься. Место для нее построено, а сам проект заморожен. Фи-фабрика – это коллайдер с высокой светимостью в районе Фи-мезонного резонанса; ее светимость могла бы превысить на несколько порядков полученную на ВЭПП-2М при этой энергии. Решим ли мы продолжать этот проект – зависит от результатов работающей Фи-фабрики во Фраскати. Но пока светимость фабрики во Фраскати едва превзошла (в 2 раза) светимость ВЭПП-2М; хотя там очень хороший детектор.

К сожалению, инжекционный комплекс мы делаем очень медленно. По контрактам мы делаем крупные вещи и гораздо быстрее, чем этот инжекционный комплекс, средства на создание которого мы и должны зарабатывать за счет контрактов.

Кроме электрон-позитронных коллайдеров на основе накопителей, очень много сил и изобретательности было нами вложено в разработку линейных коллайдеров. Дело в том, что синхротронное излучение, оказавшееся столь полезным при реализации электрон-электронных и электрон-позитронных экспериментов (потому что позволило накапливать и сжимать пучки в накопителях) при повышении энергии до 100 ГэВ и выше, катастрофически растет и не позволяет проводить эксперименты при столь высоких – и таких интересных и важных – энергиях. Начиная с 60-х гг. концептуально и технологически в ИЯФ было сделано очень много, но такие гигантские проекты могут реализовываться только при полном финансировании государства, что в России сейчас абсолютно невозможно. Теперь мы участвуем (в скромных масштабах) в общемировых усилиях по развитию направления электрон-позитронных, фотон-фотонных и фотон-электронных линейных коллайдеров с энергией вплоть до 1000 ГэВ (до 1 ТэВ).

Мы много (и, можно сказать, успешно) занимались развитием и осознанием необходимости мюонных коллайдеров и поиском возможностей – физических и технологических – их создания. Сегодня этим занимаются уже в десятках лабораторий. Естественная для мюонных коллайдеров область энергий, где они дадут принципиально дополнительную информацию для физики элементарных частиц, – это область в несколько ТэВ, о которой пока можно только мечтать.

Как вы уже, я думаю, давно поняли, мы тесно сотрудничаем с большинством ведущих лабораторий в мире, которые занимаются физикой элементарных частиц. Они при этом приобретают наши возможности (разработческие, изобретательские и производственные). А нам это, кроме научного или технологического интереса, приносит дополнительное финансирование.

Самое крупномасштабное взаимодействие у нас сейчас с Европейской организацией по физике высоких энергий (ЦЕРН) по проекту Большого Адронного Коллайдера (LHC). Это самый большой проект в мире на данный момент (периметр 30 км!). Мы для этого проекта выполняем работы примерно на 100 млн швейцарских франков с симметричным финансированием от ЦЕРН и от России. Это, например, магнито-вакуумные каналы, которые переводят протоны из синхротрона в накопительные кольца коллайдера (общая длина 5,5 км! общий вес поставляемого нами оборудования 4000 тонн! доставка грузовыми машинами на расстояние в 5000 км!). Первые магниты были поставлены в 1999 г. А летом этого (2001) года поставка была закончена.

Электронному охлаждению следовало бы посвятить отдельный рассказ. Это одно из направлений, где мы сегодня являемся абсолютными законодателями, разработчиками и поставщиками соответствующего оборудования.

Один из примеров – «электронный холодильник» для тяжело-ионного накопителя в Дармштадте, основном центре Германии по тяжелым ионам.

Осуществляется проект нового ускорительного комплекса в Ланчжоу (Китай); для двух ионных колец (на 70 МэВ/нуклон и 600 МэВ/нуклон) у нас будут сделаны два «холодильника», соответственно, на 35 кэВ и 300 кэВ.

Пока мы работаем в области прямых напряжений до 1 МэВ, 1,5 МэВ (может быть, до нескольких МэВ), можно работать в режиме непрерывного ускорения электронов и последующей рекуперации их энергии. Когда требуются электроны, скажем, 50 МэВ для охлаждения тяжелых ионов на энергии встречи в Брукхевенском тяжело-ионном коллайдере с энергией 100 ГэВ/нуклон для многократного повышения светимости, то нужно переходить от электронных ускорителей прямого действия к высокочастотным линейным ускорителям, также с рекуперацией энергии.

Еще не решено строить, но всем очень хочется, – линейный коллайдер, в котором мы тоже, возможно, будем принимать участие. Это в районе Гамбурга, два линейных ускорителя полной длиной 30–40 км, стреляющих навстречу друг другу. Есть конкурирующие проекты, но ни один проект еще не принят.

Кроме того, мы участвуем во многих других международных проектах, связанных с источниками синхротронного излучения, с поставкой и разработкой ускорителей для технологического применения и т. д.

Таким образом, в очень сложных условиях – очень слабого государственного финансирования и активного привлечения наших специалистов зарубежными исследовательскими центрами – ИЯФ строится, и с некоторым успехом, жить и развиваться.